第47卷　第12期
2024年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 12
Dec. 2024

哈密市峡沟水库中小洪水特征及气象成因

白松竹[1]，　关　清[1]，　江远安[2]，　栾亚睿[2]，　张　俊[2]

（1. 哈密市气象局，新疆 哈密　839000；2. 新疆维吾尔自治区气象台，新疆 乌鲁木齐　830002）

摘　要： 选取新疆哈密市伊吾县峡沟水库及伊吾水文站水情数据、水库上游流域5个自动气象站小时降水量观测数据及常规高空观测和NCEP再分析资料，分析了峡沟水库2015—2022年共计8次中小洪水过程的水文特性和流域降水特征。结果表明：(1) 上游型洪水过程洪峰持续时间在10 h内，洪量集中、洪水涨退平稳；下游型洪水过程涨水快、洪峰持续时间超过10 h，且上游型洪水致洪强降水的平均降水量、最大小时雨强没有下游型大，但是平均降雨历时较长，超过蓝色预警指标的洪峰持续时间相对较短，引发的最大洪峰流量、最高水位及库容涨差没有下游型大。(2) 伊吾水文站洪峰流量与水库以上流域内不同时段最大降水量呈正相关关系，洪峰流量与上游区气象站的最大3 h降水量和下游区气象站最大6 h降水量关系最为密切。(3) 下游型洪水致洪强降水发生时，100 hPa南亚高压呈双体型，中亚长波槽和500 hPa低槽位置均较上游型偏南，西太平洋副热带高压位置较上游型偏北；下游型洪水致洪强降水发生时，700~500 hPa比湿、700 hPa水汽通量和涡度、700~500 hPa假相当位温均较上游型的对应值偏大，为致洪强降水预报提供了有利指标。

关 键 词： 峡沟水库；洪水特征；环流特征；洪峰流量

文章编号： 1000－6060(2024)12－2115－09(2115～2123)

水库是我国防汛抗旱、供水发电、灌溉等广泛采用的工程措施之一，据《第一次全国水利普查公报》统计，我国水库数量居世界首位，其中小型水库占比95.2%[1]。强降水是引发洪水的重要诱因，随着全球气候变暖，极端暴雨天气事件频率呈增加态势[2]，水库安全越来越被学者们重视。针对水库流域降水特征，国内有关学者分析了河南省大型水库上游降水的气候变化特征[3]、辽宁省大伙房水库流域旱涝急转特征[4]、三峡水库最大暴雨洪水组合特性[5]，并指出未来福建省泉州市山美水库流域极端降水量和不确定性增加，灾害风险增大[6]。针对降水量与入库流量关系，分析了三峡水库[7]、皂市水库[8]、江垭水库[9]上游降水对入库流量的影响，利用气象因子和入库流量的关系建立了入库流量预测模型[10-13]，探讨了全国及典型区域（云、贵、渝）灾害前期1 h、6 h、12 h及24 h的降水与山洪灾害关系，建立了山洪灾害动态降水阈值推求方程[14]。精准的洪水预报建立在对强降水天气预报的基础上，井喜等[15-17]分别对黄土高原、闽西北山区、长江中下游致洪暴雨的天气学成因进行分析，上述研究为当地致洪暴雨的预报预警提供了支撑，也为新疆水库洪水分析及预报提供了参考和借鉴。

新疆地域辽阔、地形复杂，截至2018年底，全疆共修建小型水库451座[18]。小型水库由于集水面积小、汇流时间短，导致防洪功能相对薄弱，应对极端风险能力弱，因此，对于小型水库安全的气象服务显得尤为重要。新疆小型水库上游的河流洪水一般分为融雪洪水、暴雨洪水及暴雨融雪混合型洪水，且暴雨洪水多发生在夏季（6—8月），洪水来势迅猛，对水库等水利工程的威胁和破坏性较大[19-22]。一些学者

收稿日期： 2023-11-05；　**修订日期：** 2023-12-20
基金项目： 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项（2022B03027-3）资助
作者简介： 白松竹（1979-），女，本科，副高级工程师，主要从事天气预报服务与灾害性天气机理研究. E-mail: hmqxt@126.com
通讯作者： 江远安（1969-），女，硕士，正高级工程师，主要从事气象灾害风险预警和评估研究. E-mail: jya_69@163.com

分析了新疆“96·7”[23]、乌苏市“2001·7”[24]暴雨洪水的成因,分别采用比降面积法[25]、Floodarea模型[26]确定了昌吉回族自治州军塘湖河流域和阿克苏地区苏巴什水库上游洪峰流量,提高了对山区小流域暴雨山洪形成、发展和致灾演变的理解。本文以新疆哈密市伊吾县山区小型水库—峡沟水库为研究对象,分析其中小洪水过程的水文特征及气象成因,揭示气象条件特别是流域降水对洪峰的影响及滞后效应,提高小型水库中小洪水的预报预警水平,为当地中小洪水提供更加科学、合理的决策依据和参考。

1 资料和方法

1.1 研究区概况

峡沟水库位于新疆东部哈密市伊吾县境内,属拦河水库,是伊吾河控制性骨干调蓄工程,是一座具有农业灌溉、生态保护、工业供水、防洪等多目标综合利用的小(I)型水利枢纽[27]。峡沟水库设计灌溉面积3586.67 hm^2,灌溉保证率95%,年生态用水量2.4×10^7 m^3,农业年供水总量2.0×10^7 m^3,年工业供水(P=95%)1.6×10^7 m^3,若遇超标准洪水,将对下游苇子峡乡(327户、687人,耕地1.17 km^2)造成人员及财产安全隐患。工程总库容为9.6×10^6 m^3,水库设计洪水位1485.17 m(50 a一遇),对应库容2.7×10^6 m^3,校核洪水位为1487.95 m(1000 a一遇),对应库容9.6×10^6 m^3,具有防洪、灌溉、工业等综合效益。

峡沟水库在伊吾河中游的峡沟河段,伊吾河是哈密市年径流量最大的一条河流,也是哈密市唯一一条终年不封冻的河流。该河发源于海拔4200 m左右的齐拉客冰川群,由大小白杨沟和科托沟、塔什克其克、纳衣塔克等支流汇合而成,流域地势南高北低,南部高山区发育有永久性冰川,中低山区沟壑纵横,河岸分布有部分森林和高寒草甸;北部平原为径流散失区[28-30]。峡沟水库水源来自伊吾河,其洪水类型与伊吾河一致,洪水类型可分为暴雨型洪水、融雪型洪水及暴雨融雪混合型洪水3种;暴雨型洪水主要发生在夏季的7、8月,且水位陡涨陡落,峰高量大,来势凶猛,具有极强的破坏性,极易成灾[19,31]。峡沟水库位于天山北坡,地势从北到南逐渐增高,上游流域有伊吾水文站,另有5个气象站(1个国家气象站、4个区域自动气象站),将流域内5个气象站按照海拔高度的不同分为上游区和下游区,上游区气象站点海拔高度>2100 m,气象站点为吐葫芦乡甘沟村(Y6359)、吐葫芦乡泉脑村(Y6332);下游区海拔高度1600~1800 m,气象站点为吐葫芦乡(Y6366)、伊吾县(52118)、伊吾镇(Y6333),上、下游区气象站点分布见图1。

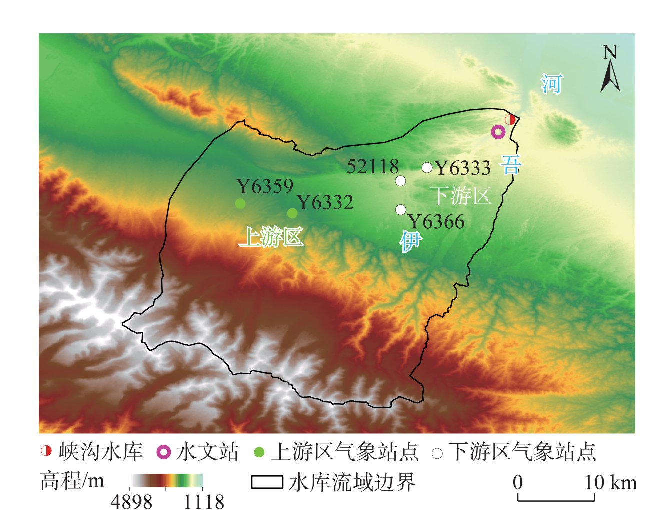


图1 伊吾县峡沟水库上游区和下游区气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations upstream and downstream of Xiagou Reservoir in Yiwu County

1.2 资料来源

文中使用的资料主要有:(1)伊吾县峡沟水库和伊吾水文站2015—2022年水库水位、库容、流量等水文数据。(2)峡沟水库流域上游1个国家气象站和4个区域自动气象站2015—2022年逐小时降水量观测资料,资料来源于气象大数据云平台(天擎),严格实现了数据质量控制。(3)常规高空观测资料、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)1°×1°再分析资料(时间分辨率选取6 h)。

1.3 洪水个例选取

本文采用王海潮等[32]、陈建等[33]提出的洪峰流量、流量涨差、水位涨差、洪水涨幅和雨洪峰值时间差等指标,开展暴雨洪水特性分析。水情预警依据洪水量级、枯水程度及其发展态势,由低至高依次用蓝色、黄色、橙色、红色4个等级表示:(1)蓝色预警为水位(流量)接近警戒水位(流量)或洪水要素重现期接近5 a;(2)黄色预警为水位(流量)达到或超过警戒水位(流量)或洪水要素重现期达到或超过5 a;(3)橙色预警为水位(流量)达到或超过保证水位(流量)或洪水要素重现期达到或超

过20 a；(4) 红色预警为水位(流量)达到或超过历史最高水位(最大流量)或洪水要素重现期达到或超过50 a。

根据伊吾水文站的历史洪水要素重现期计算得出，蓝色预警为流量≥45 $m^3 \cdot s^{-1}$，黄色预警为流量≥50 $m^3 \cdot s^{-1}$，橙色预警为流量≥80 $m^3 \cdot s^{-1}$，红色预警为流量≥85 $m^3 \cdot s^{-1}$。水库达到蓝色预警及以上流量时，至少出现小型或中型洪峰，本文将流量达到蓝色预警及以上的洪水作为中小洪水个例的入选条件。

2 洪水水文特性

依据上述洪水个例选取标准，2015—2022年峡沟水库共有8场由强降水造成的中小洪水过程，历次洪水过程中最大洪峰流量达到蓝色、黄色、红色预警的分别出现2次、4次、2次，未发生橙色预警洪水。

表1为2015—2022年峡沟水库8场中小洪水过程流域降水概况。可见，峡沟水库由强降水造成的中小洪水过程主要集中在6月中旬至8月中旬，以8月中旬出现最多，这与吴江涛等研究哈密地区的洪水分布特征相似[19,31]。根据洪水过程发生前峡沟水库以上流域的强降水落区，将洪水过程分为上游型洪水(简称上游型)和下游型洪水(简称下游型)；上游型洪水共6次，强降水落区位于水库以上流域的上游区域；下游型洪水共2次，强降水落区位于水库以上流域的下游区域。

2.1 上游型洪水

上游型洪水过程发生时，水库上游区气象站点降水多以中到大雨为主(表1)，降水持续时间在10.0 h内，降水均匀、平均降水量和小时雨强均较小。从水文特征来看(表2)，上游型洪水最大洪峰流量45.5~74.0 $m^3 \cdot s^{-1}$，均为蓝色~黄色预警洪水；洪水涨幅30.4~57.9 $m^3 \cdot s^{-1}$，洪峰持续时间1~9 h，雨洪时间差7~9 h，水库水位涨幅0.3~3.0 m，库容增幅16.7×10^4~138.5×10^4 m^3。洪水达到蓝色预警最长持续时间为11 h，达到黄色预警最长持续时间为5 h。

2.2 下游型洪水

下游型洪水过程发生时，水库上游区域气象站点降水均为暴雨(表1)，降水持续时间相对较长，平均降水量和小时雨强大，有时伴有短时强降水。从水文特征来看(表2)，下游型中小洪水最大洪峰流量147.0~241.0 $m^3 \cdot s^{-1}$，均为红色预警洪水，洪水涨幅大，为120.0~210.0 $m^3 \cdot s^{-1}$，洪峰持续时间长，在10 h以上，水库水位涨幅5.8~9.6 m、库容增幅283.7×10^4~335.0×10^4 m^3。洪水达到蓝色预警最长持续时间为22 h，达到红色预警最长持续时间为6 h。

可见，上游型洪水过程平均降水量、最大小时雨强、最大洪峰流量、水位及库容涨差均较下游型小，平均降雨历时及洪峰持续时间均较下游型短。

3 洪水过程对降水的响应关系

3.1 降水量与洪峰流量关系

挑选各场次洪水过程伊吾水文站最大洪峰流量、过程增幅与峡沟水库上游流域气象站点最大降水量和最大小时雨强绘制图2，可见最大洪峰流量、洪水涨幅与流域上游区域气象站的最大累积降水量、最大小时雨强存在明显的正相关关系。即一次洪水过程中，当上游区域气象站点累积降水量大或者小时雨强大时，峡沟水库上游伊吾水文站断面的

表1　2015—2022年峡沟水库中小洪水过程流域降水概况及区域分型

Tab. 1　Precipitation profile and reginal classification of small and medium flood processes in Xiagou Reservoir area from 2015 to 2022

洪水个例	最大累积降水量/mm(站号)	最大日降水量/mm·h⁻¹(站号)	平均降水量/mm	最大小时雨强/mm·h⁻¹(站号)	平均降水历时/h	区域分型
2015年6月29—30日	18.8(Y6359)	17.2(Y6359)	14.5	6.2(Y6359)	8.2	上游型
2015年8月12日	17.6(Y6359)	17.6(Y6359)	13.8	3.8(Y6366)	9.6	上游型
2016年8月9日	14.4(Y6359)	14.4(Y6359)	6.8	2.4(Y6332)	8.6	上游型
2017年8月18—19日	13.7(Y6359)	13.7(Y6359)	11.9	5.4(52118)	8.0	上游型
2018年6月18—19日	15.9(Y6359)	15.9(Y6359)	11.1	4.4(Y6366)	6.8	上游型
2018年7月31日	41.3(Y6333)	41.3(Y6333)	32.5	12.0(Y6333)	11.0	下游型
2021年7月24日	15.8(Y6359)	15.8(Y6359)	7.2	3.1(Y6359)	7.8	上游型
2021年8月16—17日	26.3(52118)	16.9(Y6332)	20.1	6.8(Y6359)	15.3	下游型

表2 2015—2022年峡沟水库中小洪水过程水文特征

Tab. 2 Hydrological characteristics of middle and small flood processes in Xiagou Reservoir area from 2015 to 2022

洪水个例		最大洪峰流量/m³·s⁻¹	洪水涨幅/m³·s⁻¹	水位涨差/m	库容增幅/10⁴ m³	雨洪时间差/h	雨洪峰值时间差/h	洪峰持续时间/h	蓝色预警流量持续时间/h	黄色预警流量持续时间/h	橙色预警流量持续时间/h	红色预警流量持续时间/h
上游型	2015年6月29—30日	45.5	37.4	0.3	16.7	8	1	1	1	–	–	–
	2015年8月12日	67.9	52.4	0.8	54.9	7	6	9	11	4	–	–
	2016年8月9日	49.3	30.4	0.8	39.6	8	7	1	1	–	–	–
	2017年8月18—19日	66.9	57.9	2.0	100.0	9	4	7	7	5	–	–
	2018年6月18—19日	74.0	32.5	3.0	138.5	9	4	3	3	3	–	–
	2021年7月24日	53.6	32.7	2.5	85.0	8	10	6	6	2	–	–
下游型	2018年7月31日	241.0	210.0	5.8	283.7	6	6	22	22	22	6	6
	2021年8月16—17日	147.0	120.0	9.6	335.0	6	7	10	10	7	3	1

洪峰流量、洪水涨幅也大。

提升防洪预警的准确率和提前量，有利于提前安排部署相关防洪措施，最大降低洪水灾害产生的影响[34]。采用算术平均法计算上游区气象站和下区气象游站1 h、3 h、6 h、9 h、12 h降水量，统计分析不同时段最大降水量与洪峰流量相关关系（表3）。可见，伊吾水文站洪峰流量与水库以上流域的上游

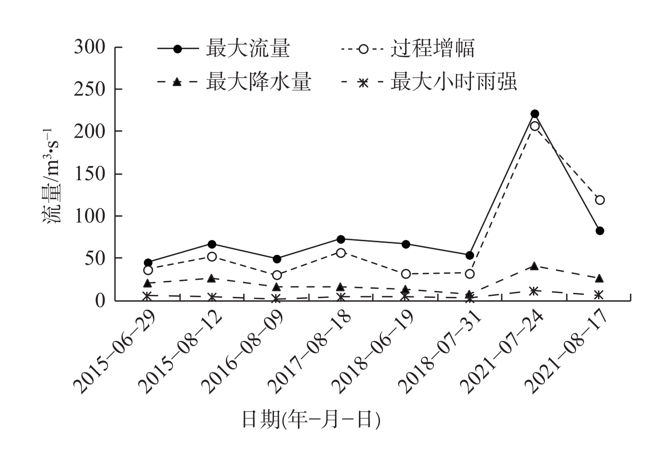


图2 各场次洪水过程洪峰流量与降水特征量的关系

Fig. 2 Relationship between discharge and precipitation during each flood

表3 峡沟水库上游流域气象站点不同时段最大降水量与洪峰流量相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between the maximum rainfall in different periods at meteorological stations in the upstream basin of Xiagou Reservoir and the peak flood discharge

气象站位置	1 h降水量	3 h降水量	6 h降水量	9 h降水量	12 h降水量
上游区气象站	0.1994	0.4382	0.4122	0.2955	0.2647
下游区气象站	0.6186	0.7901	0.8612	0.8379	0.8437

区和下游区的气象站点降水量均呈正相关关系，洪峰流量与上游区气象站最大3 h降水量和下游区气象站最大6 h降水量的相关性最强。上游区气象站的3 h降水量和下游区气象站的6 h降水量可作为发生洪水的预警指标。统计分析各场次洪水过程降水量，发现当上游2站的3 h降水量平均值达到4.0 mm以上时，将在8 h后达到最大洪峰；下游3站的6 h降水量平均值达到4.0 mm以上时，将在6 h后出现最大洪峰；当出现短时强降水时，出现最大洪峰的时间较短。

3.2 典型洪水过程对比

为进一步对比分析两型洪水过程的异同点，选取最大洪峰流量、洪水涨幅及洪水蓝色预警持续时间均较长的2015年8月12—14日和2018年7月31日—8月1日2次过程分别代表上游型和下游型洪水过程，探讨2种类型洪水过程的雨洪特征异同点。

3.2.1 降水实况对比 上游型洪水过程，降水起止时间为2015年8月12日00:00—11:00，峡沟水库上游区2个气象站点平均降水量16.5 mm，下游区3个站平均降水量12.0 mm。最大累积降水量为17.6 mm，出现在Y6359站（位于上游）；最大小时雨强3.8 mm·h⁻¹，出现在Y6366站（位于下游）。水库流域各气象站点降水时长9~11 h，平均降水时长9.6 h；水库流域内最大小时雨强均出现在06:00。此次过程降水强度小、持续时间短、降水量空间差异不大。

下游型洪水过程，降水起止时间为2018年7月31日02:00—14:00，峡沟水库上游区2站平均降水量21.2 mm，下游区3站平均降水量40.0 mm。最大累积降水量为41.3 mm，出现在Y6333站（位于下

游）；最大小时雨强 12.0 mm·h⁻¹，亦出现在 Y6333 站。水库流域各气象站点降水时长 8~13 h，平均降水时长 11.0 h，下游区气象站最大小时雨强出现在 06:00，上游区气象站最大小时雨强出现在 09:00。此次过程降水强度大、范围广、持续时间长、累积雨量大、降水量空间差异大。

3.2.2　洪水过程对比　分析2次洪水过程水库流域气象站降水量与伊吾水文站流量变化关系（图3），2015年8月12日的上游型洪水过程为单峰型，洪量集中，洪水涨退平稳，伊吾水文站最大洪峰流量 67.9 $m^3 \cdot s^{-1}$，12日08:00—11:45流量从6.8 $m^3 \cdot s^{-1}$猛增至 67.9 $m^3 \cdot s^{-1}$，12:15后流量开始缓慢减小，洪峰持续时间短，洪水时段总长度为8 h。上游气象站出现最大降水后8 h流量开始增加，小时最大降水量出现后4 h达到蓝色预警标准、6 h出现最大洪峰。上游气象站3 h降水量达到4.0 mm之后7 h流量达到蓝色预警标准，9 h后出现最大洪峰。

2018年7月31日的下游暴雨型洪水过程为单峰型，洪量集中、洪水涨退幅度大、持续时间长。伊吾水文站监测最大流量达241.0 $m^3 \cdot s^{-1}$，31日09:00—12:10流量由34.8 $m^3 \cdot s^{-1}$激增至241.0 $m^3 \cdot s^{-1}$，此后流量开始减退，至8月1日00:00，流量仍保持在60.3 $m^3 \cdot s^{-1}$，洪峰持续时间长，洪水时段总长度长达22 h；下游区气象站出现最大降水6 h后流量开始增加，小时降水量出现最大值4 h后达到橙色预警标准、6 h后出现最大洪峰；下游区气象站6 h累积降水量达到4.0 mm后4 h流量达到橙色预警标准、6 h后出现最大洪峰，最大值出现后1 h出现最大洪峰，最大值出现即达到橙色预警标准。

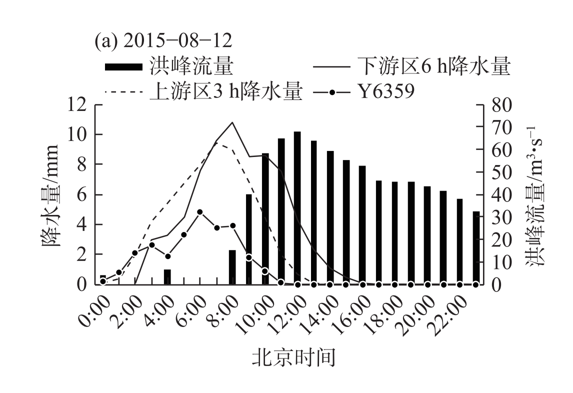
以上分析表明，上游型洪水降水强度小、持续时间短，洪水涨退平稳、洪量集中、洪峰持续时间短；下游型洪水降水强度大、累积雨量大、持续时间长，洪水涨水迅速、洪量集中、洪峰持续时间长。上游型洪水过程中雨洪时间差在8 h左右、下游型洪水过程中雨洪时间差在6 h左右，上游区气象站3 h降水量和下游区气象站6 h降水量达到4.0 mm可作为未来入库流量达到警戒流量的降水指标，作为水库调蓄水决策参考，上游区气象站的3 h降水达到4.0 mm后7 h达到蓝色预警标准、9 h出现最大洪峰，下游区气象站6 h降水达到4.0 mm后4 h达到橙色预警标准、6 h出现最大洪峰。

4　气象成因分析

4.1　环流背景

致洪强降水的发生是多种尺度天气系统相互作用的结果，其中大尺度环流对强降水的发生发展有明显的制约作用。研究表明，新疆夏季暴雨发生时，100 hPa南亚高压呈双体型，2个闭合高压中心分别位于伊朗高原东部和青藏高原[35-37]。分析两型过程100 hPa环流形势（图略），上游型共有3次过程南亚高压呈单体型，3次过程南亚高压呈双体型，中亚长波槽位于巴尔喀什湖地区，槽底位于35°N以北。下游型南亚高压呈双体型（2个高压中心分别位于伊朗高原和青藏高原东部），且东部中心强于西部中心，中亚长波槽槽底位于35°N以南。可见，下游型中亚长波槽位置更南，槽前西南气流更加旺盛，更加有利于中低层水汽的补充，为强降水的发生提供了更加有利的大尺度环流背景。

2种类型致洪强降水发生前，500 hPa中高纬均为两脊一槽型，两脊分别位于欧洲和贝加尔湖附



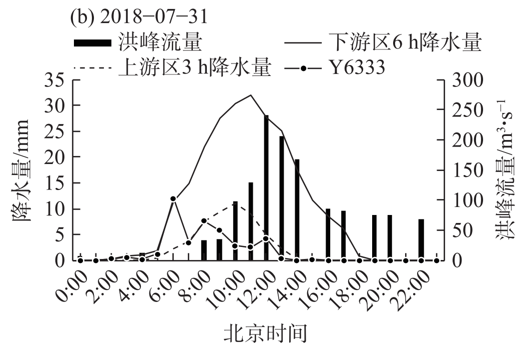


图3　2次过程水库以上区域不同时段降水量与洪峰流量关系

Fig. 3　Relationship between precipitation and peak flow in different time periods in the area above the reservoir during two processes

近，不同的是上游型低槽位于西西伯利亚地区（图略），低槽中心位于巴尔喀什湖北部，西太平洋副热带高压（简称副高）稳定位于东南沿海；下游型低槽位于中亚地区，低槽中心位于巴尔喀什湖南部，副高位于河套地区，峡沟水库位于副高西侧偏南气流上。其共同特征是：伊朗副热带高压向北发展，与欧洲脊同位相叠加，环流径向度大，水库区域位于槽前西南气流控制范围。700 hPa河西走廊至哈密为偏东气流，偏东风受到西北—东南走向的天山地形阻挡，使得水汽再次迅速辐合聚集，有利于强降水的形成。不同的是下游型低槽中心更偏南，有利于低纬度水汽北上，且副高西伸北挺位置偏北，对于水汽输送和阻碍系统东移作用显著。

可见，上游型致洪强降水过程500 hPa低槽位置较为偏北，热力、动力条件相对较弱，造成的降水为稳定性降水，故此类型洪水多呈洪峰持续时间短，洪量集中，洪水涨退平稳的特征；而下游型致洪强降水过程500 hPa低槽位置较上游型更为偏南，热力、动力条件好，且具有对流性降水特征，降水强度和累积降水量均较上游型大，从而造成此类型洪水多呈涨水快、洪峰持续时间长的特征。

4.2 物理量场特征

新疆属于干旱半干旱地区，水汽对强降水的产生具有非常重要的作用，对比分析8次致洪强降水过程峡沟水库上游区域700~500 hPa比湿和水汽通量场（表4），可见两型致洪强降水过程500 hPa水汽通量相差不大，下游型700~500 hPa比湿、700 hPa水汽通量明显较上游型偏大，这是因为下游型致洪强降水过程500 hPa低槽位置较为偏南且副高位置偏北，更有利于引导水汽向峡沟水库区域输送。

统计分析两型过程垂直速度和涡度（表4），可见，两型过程700~500 hPa均为上升运动，且垂直速度值相差不大；700~500 hPa均为正涡度区，上游型500 hPa涡度值0~10×10^{-5} s^{-1}，700 hPa涡度值10×10^{-5}~20×10^{-5}·s^{-1}；下游型500 hPa涡度值10×10^{-5}·s^{-1}，700 hPa涡度值20×10^{-5}·s^{-1}；可见，下游型致洪暴雨700 hPa旋转程度更强，更有利于天气系统的增强。

假相当位温是表示大气温度、压力和湿度的特征量，综合表征了大气的温湿特征，可以反映大气能量的分布，其水平与垂直分布和对流的发生发展关系密切[38]。两类致洪强降水过程发生时700~500 hPa假相当位温数值差异较大，上游型500 hPa假相当位温328~340 K、700 hPa假相当位温328~336 K，下游型500 hPa假相当位温342~352 K、700 hPa假相当位温340~348 K，表明下游型具有更多不稳定能量积累，能够产生更强的垂直运动。

表4 历次致洪强降水过程物理量概况

Tab. 4 Overview of physical quantity in previous flood-inducing precipitation processes

洪水个例		比湿/g·kg^{-1}		水汽通量/g·cm^{-1}·hPa^{-1}·s^{-1}		垂直速度/m·s^{-1}		涡度/10^{-5}·s^{-1}		假相当位温/K	
		500 hPa	700 hPa	500 hPa	700 hPa	500 hPa	700 hPa	500 hPa	700 hPa	500 hPa	700 hPa
上游型	2015年6月29—30日	3.0	7.0	2.0	4.0	−1.0	−1.5	10	10	332	336
	2015年8月12日	3.5	7.0	6.0	8.0	−2.5	−1.5	10	20	328	328
	2016年8月9日	4.0	6.0	6.0	4.0	−2.0	−1.5	10	10	340	336
	2017年8月18—19日	3.0	6.0	6.0	4.0	−0.5	−1.2	0	10	340	332
	2018年6月18—19日	3.0	5.0	4.0	6.0	−1.0	−1.5	0	10	334	332
	2021年7月24日	4.0	7.0	6.0	4.0	−1.0	−1.5	10	10	340	334
下游型	2018年7月31日	6.0	10.0	6.0	10.0	−1.0	−1.5	10	20	352	348
	2021年8月16—17日	4.5	8.0	8.0	8.0	−1.5	−1.5	10	20	342	340

5 结 论

（1）2015—2022年峡沟水库中小洪水过程共有8场，主要集中在6月中旬至8月中旬，7月下旬和8月中旬出现最多；根据中小洪水过程流域上游强降水落区可将其分为上游型和下游型两类，上游型中小洪水过程发生时水库上游区域降水多以中到大雨为主，下游型中小洪水过程发生时水库上游区域降水均为暴雨。

（2）历次洪水过程中最大洪峰流量达到蓝色、黄色、红色预警的分别出现2次、4次、2次，上游型洪水多呈洪峰持续时间短，洪量集中，洪水涨退平稳的特征，下游型洪水呈涨水快、洪峰持续时间长

的特征，且下游型过程平均降水量、最大小时雨强、最大洪峰流量、水位及库容涨差均较上游型大，平均降水历时及洪峰持续时间均较上游型长。

（3）伊吾水文站洪峰流量与水库以上区域的上游区和下游区气象站不同时段最大降水量呈正相关关系，洪峰流量与上游区气象站最大3 h降水量和下游区气象站最大6 h降水量相关性最强；当上游区气象站3 h降水量平均值达到4.0 mm以上时，将在8 h后达到最大洪峰；下游区气象站6 h降水量平均值达到4.0 mm以上时，将在6 h后出现最大洪峰；当出现短时强降水时，出现最大洪峰的时间较短。

（4）2种类型致洪强降水环流形势的共同点是500 hPa中高纬均为两脊一槽型，伊朗副高与欧洲脊同位相叠加，水库区域位于槽前西南气流控制范围，700 hPa河西走廊至哈密为偏东气流。不同的是，下游型致洪强降水过程100 hPa南亚高压呈双体型，中亚长波槽位置较上游型更偏南，500 hPa低槽位于中亚地区，低槽中心位于巴尔喀什湖南部，副高位于河套地区；上游型致洪强降水500 hPa低槽位于西西伯利亚地区，低槽中心位于巴尔喀什湖北部，副高稳定位于东南沿海。

（5）2种类型致洪强降水过程500 hPa水汽通量、700~500 hPa垂直速度相差不大，下游型700~500 hPa比湿、700 hPa水汽通量和涡度、700~500 hPa假相当位温均较上游型大。

参考文献（References）

[1] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013: 53-57. [Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics. Bulletin of the first national water resources census[M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2013: 53-57.]

[2] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111 (D5): D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.

[3] 甘容, 李丹丹, 杨峰, 等. 1952—2017年出山店水库上游降水时空变化[J]. 水土保持研究, 2022, 29(4): 150-158. [Gan Rong, Li Dandan, Yang Feng, et al. Spatiotemporal variation of precipitation in upper upstream of Chushandian Reservoir from 1952 to 2017[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 150-158.]

[4] 岳树鹏. 1959—2018年大伙房水库流域旱涝急转特征分析[J]. 人民珠江, 2019, 40(6): 46-53. [Yue Shupeng. Analysis of drought-flood abrupt alternation in Dahuofang Reservior Basin during 1959—2018[J]. Pearl River, 2019, 40(6): 46-53.]

[5] 王必新, 刘帆, 杨丽. 三峡水库2012年最大暴雨洪水组合特性研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(22): 29-31. [Wang Bixin, Liu Fan, Yang Li. Analysis the characteristics of the largest storm-flood combination of Three Gorges Reservoir in 2012 [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2013, 10(22): 29-31.]

[6] 宋铁燕, 陈莹, 雷享勇, 等. 山美水库流域极端降水时空变化及非平稳性特征[J]. 南水北调与水利科技, 2022, 20(2): 327-337. [Song Tieyan, Chen Ying, Lei Xiangyong, et al. Temporal and spatial variation and non-stationary characteristics of extreme precipitation in the Shanmei Reservoir Basin[J]. South-to-North Water Science & Technology, 2022, 20(2): 327-337.]

[7] 张灵, 张俊, 杜良敏, 等. 长江上游降水对三峡水库蓄水关键月入库流量的影响[J]. 地理科学进展, 2020, 39(7): 1117-1125. [Zhang Ling, Zhang Jun, Du Liangmin, et al. Influences of precipitation in the upper reaches of the Yangtze River on the key monthly inflow of the Three Gorges Reservior[J]. Progress in Geography, 2020, 39(7): 1117-1125.]

[8] 杨特群, 饶素秋, 廖春花, 等. 皂市水库入库流量预报初探[J]. 水利科技与经济, 2017, 23(11): 58-62. [Yang Tequn, Rao Suqiu, Liao Chunhua, et al. Preliminary study on reservoir inflow forecast of Zaoshi Reservoir[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2017, 23(11): 58-62.]

[9] 刘世军, 刘祥, 杨特群, 等. 溇水流域降水特征及上游降水对江垭水库来水量影响[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(2): 1-8. [Liu Shijun, Liu Xiang, Yang Tequn, et al. Precipitation characteristics of Lou-River Basin and the influence of upstream precipitation on the inflow of Jiangya Reservoir[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2020, 26(2): 1-8.]

[10] 秦鹏程, 刘敏, 肖莺, 等. 丹江口水库入库水量与气象因子的响应及其预测[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 638-647. [Qin Pengcheng, Liu Min, Xiao Ying, et al. Response of Danjiangkou Reservoir inflow to meteorological factors and forecasting [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27 (3): 638-647.]

[11] 卢珊, 李建科, 张宏芳, 等. 安康及石泉水库入库流量变化特征及汛期预测[J]. 陕西气象, 2019(2): 28-33. [Lu Shan, Li Jianke, Zhang Hongfang, et al. Characteristics of inflow and flood season forecast of Ankang and Shiquan Reservoirs[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2019(2): 28-33.]

[12] 米楚阳, 顾雪, 卿湘涛, 等. 长潭岗水库汛期日平均进库流量预报模型设计[J]. 中低纬山地气象, 2023, 47(3): 30-37. [Mi Chuyang, Gu Xue, Qin Xiangtao, et al. Design of dailu average inflow forecast model of Changtangang Reservoir in flood season[J]. Journal of Shaanxi Meteorology, 2023, 47(3): 30-37.]

[13] 王朋朋, 薛思佳, 易永力, 等. 潘家口水库上游面雨量气候特征

及入库水量预测模型探究[J]. 海河水利, 2021(4): 39−44. [Wang Pengpeng, Xue Sijia, Yi Yongli, et al. Study on the climatic characteristics of areal rainfall and the inflow forecast model of the upper reaches of Panjiakou Reservoir[J]. Haihe Water Resources, 2021(4): 39−44.]

[14] 狄静月, 许凤雯, 包红军, 等. 引发山洪的降水特征及动态阈值研究[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(6): 655−663. [Di Jingyue, Xu Fengwen, Bao Hongjun, et al. Research on precipitation characteristics and dynamic critical thresholds of flash flood disasters[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(6): 655−663.]

[15] 井喜, 井宇, 陈闯, 等. 黄土高原中β尺度致洪暴雨特征及成因[J]. 气象, 2014, 40(10): 1183−1193. [Jing Xi, Jing Yu, Chen Chuang, et al. Characterisrics and causes of meso-β scale flood-causing rainstorm on Loess Plateau[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(10): 1183−1193.]

[16] 张尾兰, 蒋宗孝, 廖才科. 闽西北两次致洪暴雨成因对比分析[J]. 气象科技, 2012, 40(4): 606−611. [Zhang Weilan, Jiang Zongxiao, Liao Caike. Comparative analysis of cause of two flood-inducing rainstorms over northwestern Fujian[J]. Meteorological Science and Technology, 2012, 40(4): 606−611.]

[17] 张芳, 张芳华, 张恒德, 等. 长江中下游一次暖区极端致洪暴雨特征及天气学成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 16−24. [Zhang Fang, Zhang Fanghua, Zhang Hengde, et al. Characteristics and sunoptic causes of the extreme warm-region flood-causing rainfall over the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences Edition), 2022, 50(5):16−24.]

[18] 吴德斌. 新疆小型水库安全管理存在的问题与对策[J]. 山西水利, 2019(5): 49−51. [Wu Debin. Problems and countermeasures in safety management of small reservoirs in Xinjiang[J]. Shanxi Water Conservancy, 2019(5): 49−51.]

[19] 吴江涛. 新疆哈密伊吾河流域洪水特性分析[J]. 地下水, 2021, 43(1): 172−173. [Wu Jiangtao. Analysis on flood characteristics of Yiwu River Basin in Hami in Xinjiang[J]. Ground Water, 2021, 43(1): 172−173.]

[20] 雷晓云, 赵以琴, 沈志伟. 新疆平原拦河水库溃坝洪水演进的数值模拟计算[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(4): 46−49. [Lei Xiaoyun, Zhao Yiqin, Shen Zhiwei. Mathematical simulation calculation for dam-routed flood of plain river-weir reservoir in Xinjiang[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003, 22(4): 46−49.]

[21] 闫晓梅, 赵艳涛, 张磊. 新疆克孜尔水库入库洪水特性分析[J]. 水利建设与管理, 2013(2): 68−71. [Yan Xiaomei, Zhao Yantao, Zhang Lei. Analysis on flood characteristics of Kizil Reservoir in Xinjiang[J]. Construction and Management of Water Conservancy, 2013(2): 68−71.]

[22] 张俊岚, 毛炜峄, 王金民, 等. 渭干河流域暴雨融雪型洪水预报服务新技术研究[J]. 气象, 2004, 30(3): 12−16. [Zhang Junlan, Mao Weiyi, Wang Jinmin, et al. A new technique of forecast and service of heavy rainfall and snow-melted flood in Weigan River area[J]. Meteorological Monthly, 2004, 30(3): 12−16.]

[23] 陈亚宁, 张家宝, 安鸿志, 等. 新疆1996年7月洪水灾害成因分析[J]. 自然灾害学报, 1997, 6(3): 48−55. [Chen Yaning, Zhang Jiabao, An Hongzhi, et al. Analysis on the cause of flood disaster in July, 1996 in Xinjiang[J]. Journal of Natural Disasters, 1997, 6(3): 48−55.]

[24] 汤世珍. 新疆乌苏市"2001·7"暴雨洪水分析[J]. 水文, 2003, 23(4): 59−62. [Tang Shizhen. Analysis of rainstorm flood disaster in July, 2001 in Wusu, Xinjiang[J]. Hydrology, 2003, 23(4): 59−62.]

[25] 朱健, 黄玉英. 新疆天山北坡军塘湖河流域"8·29"特大洪水特征与洪峰模数分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 811−817. [Zhu Jian, Huang Yuying. An analysis of flood characteristics and discharge peak modulus on "August 29" catastrophic flood event in the Juntanghu River Basin on the north slope of the Tianshan Mountains, Xinjiang[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(3): 811−817.]

[26] 张连成, 司佳怡, 胡列群, 等. 基于两种降水数据的苏巴什水库暴雨山洪淹没模拟及临界雨量阈值研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(7): 1147−1155. [Zhang Liancheng, Si Jiayi, Hu Liequn, et al. Simulation of storm flood inundation and critical rainfall threshold for disaster in Subash Reservoir based on two types of precipitation data[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(7): 1147−1155.]

[27] 杜晓宁. 再议哈密地区伊吾县峡沟水库工程设计及施工技术措施[J]. 中国水运, 2014, 14(1): 194−197. [Du Xiaoning. Further discussion on the design and construction technical measures of Xiagou Reservoir project in Yiwu County, Hami region[J]. China Water Iransport, 2014, 14(1): 194−197.]

[28] 施雅风. 中国冰川目录[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 24−29. [Shi Yafeng. A catalog of Chinese glaciers[M]. Beijing: Science Press, 1986: 24−29.]

[29] 骆光晓, 刘莉, 吴力平. 伊吾河流域水文特性分析[J]. 干旱区地理, 1999, 22(1): 47−52. [Luo Guangxiao, Liu Li, Wu Liping. Analysis on the hydrologic properties of Yiwu River valley[J]. Arid Land Geography, 1999, 22(1): 47−52.]

[30] 刘虹. 新疆伊吾河流域水文水资源分析[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(8): 42−44. [Liu Hong. Analysis on hydrological and water resources of Yiwu River Basin in Xinjiang[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2012, 40(8): 42−44.]

[31] 高颖, 吕惠萍, 吉锦环, 等. 概论伊吾河洪水成因及其防御对策[J]. 新疆气象, 2006, 29(3): 3−5. [Gao Ying, Lü Huiping, Ji Jinhuan, et al. A general analysis and prevention counterm easure of floods in the Yiwu River[J]. Meteorological of Xinjiang, 2006, 29(3): 3−5.]

[32] 王海潮, 董增川, 梁忠民, 等. 暴雨洪水相似性分析指标体系研究[J]. 水文, 2006, 26(2): 13−17. [Wang Haichao, Dong Zengchuan, Liang Zhongmin, et al. A study on the index system for storm-flood resemblance analyzing[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(2): 13−17.]

[33] 陈建, 李春红, 王峰, 等. 长江上游流域暴雨洪水相似性判别指标研究[J]. 人民长江, 2019, 50(1): 58−63. [Chen Jian, Li Chunhong, Wang Feng, et al. Study on similarity discriminant index of storm flood in upper reaches of Yangtze River[J]. Yangtze River, 2019, 50(1): 58−63.]

[34] 宋尚波. 中小河流洪水预报难点及对策分析[J]. 水利技术监督, 2018(6): 137−139, 145. [Song Shangbo. Analysis of difficulties

and countermeasures in flood forecasting for small and medium-sized rivers[J]. Technical Supervision in Water Conservancy, 2018 (6): 137-139, 145.]

[35] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987: 351-357. [Zhang Jiabao, Deng Zifeng. An introduction to precipitation in Xinjiang[M]. Beijing: Meteorology Press, 1987: 351-357.]

[36] 陈春艳, 孔期, 李如琦. 天山北坡一次特大暴雨过程诊断分析[J]. 气象, 2012, 38(1): 72-80. [Chen Chunyan, Kong Qi, Li Ruqi. Analysis of a major rainstorm in the north slope of Tianshan Mountains[J]. Meteorological Monthly, 2012, 38(1): 72-80.]

[37] 杨莲梅, 张云惠, 汤浩. 2007年7月新疆三次暴雨过程的水汽特征分析[J]. 高原气象, 2012. 31(4): 963-973. [Yang Lianmei, Zhang Yunhui, Tang Hao. Analyses on water vapor characteristics in three heavy rainstorm processes of Xinjiang in July 2007[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(4): 963-973.]

[38] 王两铭, 罗会帮. 饱和湿空气动力学的基本方程和主要特征[J]. 气象学报, 1980, 38(1): 44-50. [Wang Liangming, Luo Huibang. The basic dynamic equations and the main properties of the saturated moist air[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1980, 38(1): 44-50.]

Characteristics and meteorological causes of medium and small floods in Xiagou Reservoir of Hami City

BAI Songzhu[1], GUAN Qing[1], JIANG Yuan'an[2], LUAN Yarui[2], ZHANG Jun[2]

(1. Hami Meteorological Bureau, Hami 839000, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Meteorological Observatory, Urumqi 830002, Xinjiang, China)

Abstract: Using water regime data from Xiagou Reservoir and Yiwu Hydrological Station in Yiwu County, Hami City, Xinjiang, China alongside hourly precipitation observations from five automatic weather stations in the reservoir's upstream basin, routine upper-air observations, and NCEP reanalysis data, this study analyzed the hydrological characteristics and precipitation features of eight medium and small flood events at Xiagou Reservoir during 2015—2022. The findings are as follows: (1) Upstream-type floods exhibit peak durations within 10 hours, with concentrated flood volumes and stable rising and falling stages. In contrast, downstream-type floods rise rapidly and have peak durations exceeding 10 h. While the average rainfall and maximum hourly rainfall intensity of upstream-type flood-inducing heavy precipitation are lower than those of downstream-type, and the average rainfall duration is longer. The flood peak durations exceeding the blue warning threshold are shorter for upstream-type floods, and their corresponding maximum peak discharge, highest water level, and reservoir storage increase are significantly less than those of downstream-type floods. (2) A positive correlation exists between the peak discharge at Yiwu Hydrological Station and maximum rainfall during different time periods within the basin above the reservoir. The peak discharge shows the strongest correlation with maximum 3-hour precipitation at upstream meteorological stations and maximum 6-hour precipitation at downstream meteorological stations. (3) During downstream-type flood-inducing heavy precipitation, the 100 hPa South Asian High adopts a double-lobed structure, with the Central Asian long-wave trough and 500 hPa low trough positioned further south compared to upstream-type floods, while the subtropical high is located further north. Specific humidity between 700 hPa and 500 hPa, the 700 hPa moisture flux and vorticity, and the pseudo-equivalent potential temperature between 700 hPa and 500 hPa are higher during downstream-type flood-inducing heavy precipitation, serving as favorable indicators for forecasting such events. This study provides insights into the distinct characteristics of upstream- and downstream-type floods and offers valuable indicators for forecasting flood-inducing heavy precipitation.

Key words: Xiagou Reservoir; flood characteristics; circulation features; peak discharge